

КОТЕЛКИН Вячеслав Дмитриевич



**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ МАНТИЙНОЙ КОНВЕКЦИИ
И ЦИКЛИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ КОНТИНЕНТОВ И ОКЕАНОВ**

Специальности: 25.00.28 - океанология;
25.00.10 – геофизика, геофизические методы
поиска полезных ископаемых

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва – 2008

Работа выполнена на механико-математическом факультете
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова и в
Институте океанологии им. П.П. Ширшова

Научный консультант: член-корреспондент РАН,
доктор физико-математических наук,
профессор Лобковский Леопольд Исаевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Михайлов Валентин Олегович,
ОИФЗ РАН, Москва

доктор геолого-минералогических наук,
профессор Гончаров Михаил Адрианович,
геологический факультет МГУ, Москва

доктор физико-математических наук
Резник Григорий Михайлович,
ИОРАН, Москва

Ведущая организация: Институт динамики геосфер РАН, Москва

Защита состоится *25 ноября* 2008 г. в *15* часов на заседании
диссертационного совета Д 002.239.02 при Институте океанологии им. П.П.
Ширшова РАН по адресу: 117997 Москва, Нахимовский пр., 36.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института океанологии
им. П.П. Ширшова РАН.

Автореферат разослан *15 октября* 2008 г.

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000429044

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

А.И. Гинзбург А.И. Гинзбург

Актуальность темы. На Международной Гордоновской Конференции, состоявшейся в 1998 году в Бостоне, среди основных нерешенных проблем наук о Земле было названо выяснение причины неоднократных объединений и расхождений континентов, сопровождаемых образованием и исчезновением океанов. Распад суперконтинентов и раскрытие океанов объясняет модель мантийной конвекции с плавающими континентами В.П. Трубицына, а проблема объединения континентов и закрытия океанов сохраняет свою актуальность.

В монографии 2004 года Л.И. Лобковского, А.М. Никишина, В.Е. Хаина «Современные проблемы геотектоники и геодинамики» отмечается, что, наряду с непрерывно действующей тектоникой плит, наблюдается импульсно действующая тектоника мантийных плюмов, и необходимо найти единый механизм, одновременно объясняющий тектонику плит и тектонику плюмов. Повышенный интерес к изучению плюмов отражают выполненные под руководством Н.Л. Добрецова в Сибирском Отделении РАН физические эксперименты по моделированию суперплюмов типа Гавайского и Исландского (Геология и геофизика, 2005).

В последние годы большое внимание уделяется океаническим поднятиям, таким как поднятия Кергелен (Индийский океан), Онтонг-Джава (Тихий океан) и другие. Однако убедительного физического объяснения их происхождения до сих пор нет, в частности, международная программа глубоководного бурения на возвышенности Шатского (Тихий океан) была отклонена по причине отсутствия непротиворечивой модели её происхождения.

Прогресс компьютерных технологий превратил численное моделирование в один из ведущих методов исследования. Кроме того, временные масштабы, на которых протекает эволюция планет, недоступны физическим экспериментам, и только математическое моделирование дает уникальную возможность продолжения исследований. За рубежом неоднократно проводились и проводятся численные исследования мантийной конвекции на основе термической модели, тогда как расчеты отечественных авторов [Кеонджян, 1980; Монин и др., 1987], выполненные

в рамках химико-концентрационной конвекции, не получили поддержки и развития. Диссертация посвящена изучению отмеченных проблем на основе более общей термохимической модели мантийной конвекции и современных компьютерных технологий.

Цель работы. 1. Создать математическую модель термохимической мантийной конвекции, способную воспроизвести основные события геологической истории Земли, такие как образование и распад суперконтинентов, раскрытие и закрытие океанов.

2. Разработать надежные и эффективные алгоритмы для численной реализации двумерного и трехмерного вариантов этой модели.

3. Использовать графические и динамические возможности современных компьютерных технологий и создать программы для быстрой обработки и визуализации результатов непосредственно во время численных экспериментов.

4. С помощью прямых численных экспериментов найти и исследовать сценарий эволюции, лучше всего отвечающий геологической истории Земли.

5. Установить основные закономерности глобального геодинамического процесса, выяснить роль отдельных составляющих факторов, определить причинно-следственные связи при формировании континентов и океанов.

Научная новизна. Количественные исследования эволюции Земли традиционно проводились и проводятся на основе модели тепловой конвекции в мантии. Общая и более адекватная термохимическая модель мантийной конвекции использовалась очень редко для анализа эволюции Земли ввиду больших вычислительных трудностей. Имеющиеся в литературе результаты ограничены расчетами в декартовых координатах отдельных фрагментов термоконцентрационной конвекции. В настоящей работе в рамках термохимической модели конвекции развита новая двумерная теория экваториальных течений, которая позволила впервые провести математическое моделирование полной эволюции Земли с момента её аккреции и с учетом криволинейной геометрии мантийного слоя. В ходе моделирования был открыт новый конвективный феномен – общемантийный переворот (овертон), который убедительно объясняет причину образования суперконтинентов и перестройки океанов. В работе впервые проведено трехмерное

моделирование овертонового режима эволюции Земли, в результате которого установлен ряд новых свойств и закономерностей глобального геодинамического процесса.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Основные события геологической эволюции Земли описываются термохимической моделью мантийной конвекции, учитывающей эндотермический фазовый переход на границе верхней и нижней мантии и процессы дифференциации на внутренней и внешней границах мантийного слоя.
2. В термохимической модели возможен резкий общемантийный переворот (овертон), который происходит, когда дифференциация верхней и нижней мантии достигает критического уровня. Шаровая геометрия и фазовый барьер способствуют самоорганизации конвекции в структуру с глобальным общим стоком, который закрывает океаны и производит “сборку” суперконтинента, одновременно происходит переформирование срединно-океанических хребтов и коллизионных поясов.
3. Циклы Штилле (30–40 млн. лет) обусловлены слиянием конвективных ячеек в верхней мантии, а циклы Бертрана (170–200 млн. лет) – региональными аваланшами. Циклы Вилсона (650–900 млн. лет) определяются овертоновым режимом мантийной конвекции. Необходимым условием для запуска овертонового режима конвекции является неустойчивое начальное состояние планеты. Процесс эволюции имеет ступенчатый характер, самые существенные изменения происходят ускоренными темпами во время переворотов, при дальнейшем остывании Земли овертоны будут вырождаться в аваланши.
4. После двух циклов Вилсона положение стока начинает стабилизироваться, в результате чего формируется асимметричная дипольная структура Земли с пульсирующим континентальным и устойчивым (Тихий океан) океаническим полушариями.
5. Химические процессы придают конвекции импульсный характер. Термо-химико-конвективное взаимодействие приводит к резкому локальному усилению активности, которое выражается в виде мантийных плюмов. Плюмы “вмонтированы” в тектонику плит таким образом, что их внешними границами

служат границы вмещающей ячейки, вследствие чего плюмы эффективно используют для своей подпитки и сброса вещества большую площадь термической ячейки.

6. Трансформные разломы на дне океанов обусловлены горячими границами вторичных валиковых течений, которые возникают на фоне вынужденной термической конвекции в верхней мантии. Учет взаимодействия вынужденной верхнемантийной конвекции с плюмом химического происхождения позволяет смоделировать образование и динамику океанических поднятий. Эндотермический фазовый переход приводит к дроблению нижнемантийных плюмов и образованию семейств одновозрастных океанических поднятий и базальтовых плато.

Теоретическая и практическая значимость. Открытие овертонового режима мантийной конвекции и исследование пространственной структуры овертонов имеют фундаментальное значение для наук о Земле.

Непосредственную практическую значимость имеет региональное моделирование, но его корректность зависит от знания начального состояния региона и изменений в окружающей обстановке. Только полномасштабное моделирование может дать объективную информацию о начальных и граничных условиях, необходимых для региональных исследований.

Изложенные в седьмой главе результаты региональных исследований представляют как теоретический, так и практический интерес. Сдвиги дна океанов, происходящие вдоль трансформных разломов, играют важную роль в тектонической активности литосферы. Правильное понимание природы и структуры вторичных движений необходимо для оценки сейсмического состояния региона и предсказания катастрофических землетрясений.

Взаимодействие нижнемантийного плюма с эндотермической фазовой границей определяет способы излияния платобазальтов, знание которых помогает поиску полезных ископаемых. Нижнемантийное вещество обогащено металлами, и неотъемлемой частью траппового магматизма являются процессы рудообразования.

Компьютерные видеозаписи, полученные в ходе численных экспериментов, используются в качестве учебных материалов для студентов геологического

факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, они также переданы в геологический музей им. В.И. Вернадского и музей Землеведения МГУ.

Достоверность результатов. Алгоритмы, используемые для численных экспериментов, прошли три стадии тестирования. Алгоритмы для всех уравнений модели, которые по отдельности являются линейными, тестировались по аналитическим решениям. Совместное интегрирование в целом нелинейной системы уравнений тестировалось посредством расчета гидродинамических течений, хорошо исследованных экспериментально. Расчеты с учетом нелинейных физико-химических превращений сравнивались с результатами зарубежных авторов по термической конвекции и с экспериментами Н.М. Рубцова по распространению фронтов медленного горения.

Полученные результаты подтверждаются независимыми эмпирическими данными. Овертоновый режим соответствует данным исторической геологии по циклам Вилсона и датам образования суперконтинентов.

Начальное состояние и интенсивный стартовый переворот хорошо согласуются, как с новыми космохимическими и астрофизическими данными по аккреции планет, так и с зафиксированными в раннеархейских коматиитах и базальтах следами мощной тепловой волны, пришедшей из глубины Земли.

Результаты диссертации подтверждаются геофизическими данными по тектонике плит, гравитационным аномалиям, тепловому потоку, моментам инерции, а также последними данными сейсмофотографии мантии.

Ступенчатый характер модельного процесса совпадает с исследованиями геохимиков по эпизодическому обогащению континентальной коры.

Результаты регионального моделирования соответствуют океанологическим данным по трансформным разломам и семействам разновозрастных океанических поднятий.

Личный вклад автора. Все результаты, представленные в работе, получены лично автором или при его непосредственном участии. Вся математическая часть работы: формулировка модели, постановки задач, вывод уравнений для экваториальных течений, разработка численных алгоритмов, программ

визуализации, проведение расчетов и обработка результатов целиком выполнены автором диссертации.

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались на конференциях:

- Международные Зоненшайновские конференции, 6-я (1998) и 7-я (2001).
- Теоретический семинар Отделения геологии, геофизики, геохимии и горных наук РАН (1998-1999 гг.) под руководством акад. Д.В. Рундквиста.
- Межведомственные Тектонические Совещания, 1998-2008 гг.
- (Четвертые) Геофизические чтения имени В.В. Федынского, 2002 г.
- Школы-семинары «Современные проблемы аэрогидродинамики» под руководством акад. Г.Г. Черного, 11-я (2003), 13-я (2005) и 14-я (2006).
- Ломоносовские Чтения в МГУ им. М.В. Ломоносова.

Работа и результаты обсуждались на научных семинарах и совещаниях в Объединенном Институте Физики Земли им. О.Ю. Шмидта, в Институте Геохимии и Аналитической Химии им. В.И. Вернадского, в Геологическом Институте, в Международном Институте Теории Прогноза Землетрясений и Математической Геофизики, в Институте Динамики Геосфер, в Институте Океанологии им. П.П. Ширшова, в Институте Механики и на Механико-математическом факультете МГУ им. М.В. Ломоносова.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, семи глав, заключения, двух приложений и списка использованной литературы. Общий объем диссертации – 275 страниц, работа содержит 129 рисунков, список литературы включает 383 наименования.

Благодарности. Автор благодарен своему Учителю – Вениамину Петровичу Мясникову, в геофизической школе которого он приобщился к интереснейшей научной проблематике, где были заложены теоретические основы и привиты практические навыки исследования.

Автор благодарит Леопольда Исаевича Лобковского за полезное и плодотворное научное общение, за точный и своевременный выбор направления работы, во многом предопределивший успех моделирования, а также выражает ему свою искреннюю признательность за добросовестное выполнение обязанностей научного консультанта.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

В первой главе излагаются математические основы и современные направления геодинамического моделирования, представленные на рис. 1. Важные результаты по перемежающейся конвекции были получены американскими авторами с помощью элегантных спектральных методов, рис. 1а. По мере усложнения задач интерес к спектральным методам угас, свое практическое превосходство доказала мультигридная методика. Нелишне напомнить, что мультигридный подход был сформулирован советскими математиками [Федоренко, 1961; Бахвалов, 1966], а американские вычислители “открыли” его только в 80-е годы [Wesseling, 1992]! Выяснилось, что применение последних достижений вычислительной математики ограничивают особенности, которые традиционные сферические координаты имеют на полярной оси. Поэтому ведущие зарубежные специалисты осваивают новые координаты для работы в шаровой области.

Достижения японских специалистов, рис. 1б, представляет расчет мантийной конвекции с числом Рэлея 10^8 и изменяющейся в пределах шести порядков вязкостью. Хорошо виден сложный тонкоструктурный характер возникающих неоднородностей, которые удается разрешить благодаря “Yin-Yang” методу, использующему две сферические системы координат, скрещенные таким образом, что полярные области одной системы накрываются экваториальной зоной другой. Вычисления (на двух сетках размером $512 \times 512 \times 1536$ узлов) проводятся на земном симуляторе, который состоит из 5 120 процессоров производительностью 8 Gflops (суммарно 40 Tflops) и общей памятью – 10 Tb.

Американские вычислители идут дальше и применяют полуортогональные координаты. Разбиение сферы на шесть квадратов (“cubed sphere” technique), реализовано усилиями интернациональных коллективов [Stemmer et al., 2006; Choblet et al., 2007]. Современный уровень США в моделировании мантийной конвекции отражает программа «TERRA», развиваемая Баумгарднером. Сфера разбивается гранями икосаэдра с последующей триангуляцией (до 42 млн. узлов), применяется метод конечных элементов. Этот подход требует высококвалифицированной математической подготовки. Вычисления проводятся по

мультигридной схеме, распараллеливание алгоритма для эффективного использования возможностей массивного суперкомпьютера Cray T3E (1024-процессора, производительность 115.8 Gflops) осуществил Бунге. На рис. 1д показано распределение сверх-адиабатической температуры при моделировании с учетом сжимаемости мантии, эндотермического фазового перехода на 670 км, $dP/dT = -4 \text{ МПа/К}$, и высоких чисел Рэлея, $Ra = 1.1 \cdot 10^8$.

Сохраняется повышенный интерес к моделированию реологического поведения мантийного вещества. Однако мнения, какие реологические свойства – псевдопластичные или дилатантные – необходимо учитывать [Zhong et al., 2003; Wang, Wu, 2006; van Keken et al., 2002], расходятся. Проведя множество расчетов, [Bercovici, 2003] обнаружил, что только “экзотическая” (не монотонная) реология мантийного вещества в состоянии одновременно воспроизвести данные о локализации сдвиговых напряжений и спутниковые данные о тороидальном вращении плит, рис. 1г. В диссертации используется изовязкая реология, в связи с чем, можно отметить, что при моделировании конвекции на Венере лучшее соответствие эмпирическим данным получилось как раз в случае постоянной вязкости.

В последние годы появляется все больше работ, в которых фигурирует название термохимическая конвекция. Важность роли химических превращений в нижних горизонтах мантии, изучению которой положила начало отечественная геологическая школа, наконец-то, в связи с различием состава извержений в горячих точках и срединно-океанических хребтах [Hansen, Yuen, 2000], прояснилась для западных исследователей. Стоит подчеркнуть, что в настоящей работе под термохимической конвекцией понимаются химические изменения, происходящие непосредственно во время конвекции. Тогда как в статьях западных авторов этот же термин используется, когда исследуется движение неоднородной среды без химических реакций, которое в российской терминологии называется концентрационной или композиционной конвекцией. Современный уровень “химического” моделирования отражает работа [Baumgardner et al., 2005], рис. 1е, в которой авторы с помощью пассивных трассеров пытаются объяснить деплетированность верхней мантии за счет формирования континентальной коры.

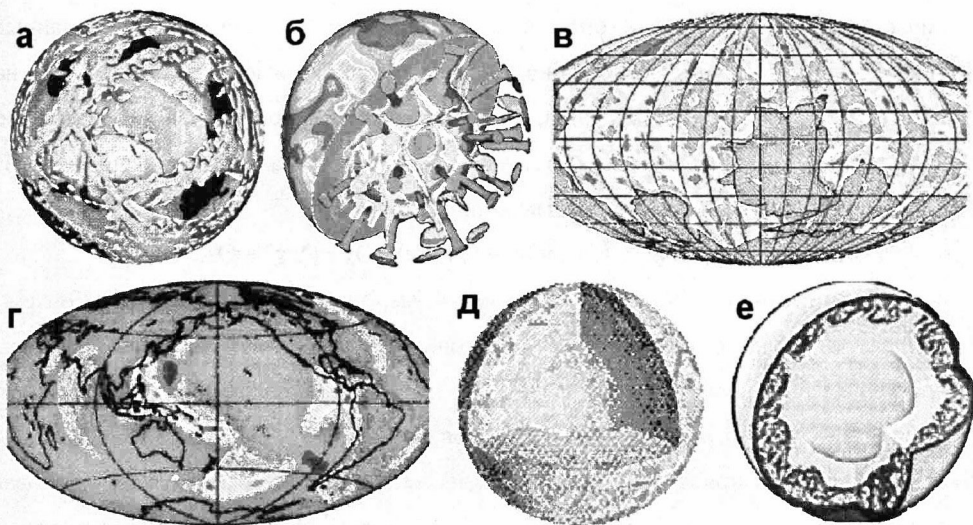


Рис. 1. Современные исследования на основе 3D-моделирования конвекции в шаровом слое: а – аваланши [Tackley, 1996]. б – плюмы [Kageyama, Yoshida, 2005], в – дрейф континентов [Трубицын, 2005], г – тороидальное движение плит [Bercovici, 2003], д – эндотермический фазовый переход [Bunge et al., 1997], е - дегазация мантии [Baumgardner et al., 2005].

Фундаментальное значение имеют проводимые под руководством В.П. Трубицына исследования роли, которую играют континенты в эволюции Земли. Согласно численному прогнозу в следующий раз континенты сойдутся вместе в районе Южного полюса, рис. 1в.

Во второй главе излагается геофизическая и геохимическая информация об эволюции Земли, которая используется при численном моделировании. Новейшие астрофизические и космохимические данные свидетельствуют [Витязев, Печерникова, 1996, 2003], что существенный нагрев недр допланетных тел, дегазация, плавление и дифференциация примитивного вещества происходили одновременно с их формированием, т.е. за миллионы и первые десятки миллионов лет. Раннее образование ядра и мантии Земли необходимо учитывать при задании начального состояния, которое играет существенную роль в выборе эволюционного пути.

При моделировании обнаружилось принципиальное противоречие между геофизическими и геохимическими данными. Геофизические данные (размер плит, гравитационные аномалии, тепловой поток) находили объяснение в рамках

общемантийной схемы конвекции, тогда как геохимические данные свидетельствовали о раздельной конвекции в верхней и нижней мантии. Лежащая на глубине 670 километров граница, разделяющая верхнюю и нижнюю мантии, обусловлена эндотермическим фазовым переходом мантийного вещества из шпинелевой γ -фазы в перовскит и магнезиевюстит



Толщина переходной области составляет 4 км, плотность растет на 0.39 г/см^3 , фазовая кривая имеет отрицательный наклон, величину которого экспериментаторы сначала относили к диапазону $\gamma = -(2 \div 3) \text{ МПа/К}$ [Liu, 1976; Ito, 1977; Jeanloz, Thompson, 1983; Ito, Takahashi, 1989; Кусков, Фабричная, 1990]. При отрицательном наклоне фазовой кривой вертикальные движения тормозятся, поскольку фазовая граница в холодном нисходящем потоке смещается вниз, рис. 2а, а в горячем восходящем – вверх, рис. 2б. В земной мантии более плотное вещество расположено снизу, поэтому граница раздела стремится вернуться в показанное пунктиром,

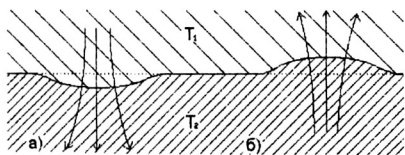


Рис. 2. Тормозящий эффект эндотермического фазового перехода, $T_2 > T_1$.

положение равновесия и тормозит перемещение вещества. В 1990 г. появились новые результаты экспериментов [Ito et al.], согласно которых отрицательный наклон фазовой кривой достигает больших значений $\gamma = -4 \text{ МПа/К} \pm 2 \text{ МПа/К}$. В 1991 г. [Machetel, Weber] провели численное исследование термической конвекции в расширенной постановке, при которой схема конвекции не постулируется априори, а находится в процессе моделирования. Варьируя наклон фазовой кривой, авторы установили (в осесимметричном случае при числе Рэлея 10^6), что при $\gamma = 0$ наблюдается общемантийная конвекция, при которой за 1 млрд. лет обмен веществом между верхней и нижней мантиями колеблется в интервале от 40% до 60%. Когда $\gamma = -4 \text{ МПа/К}$, конвекция является раздельной двухъярусной, обмен веществом составляет 2%, а перепад температур в области фазового перехода равняется примерно 750°К . Открытием стало чередование общемантийной и двухъярусной конвекции при $\gamma = -2 \text{ МПа/К}$. Авторы назвали это явление перемежающейся конвекцией. При перемежающейся конвекции большую часть

времени обмен веществом находится примерно на уровне 10%, но в короткие периоды общемантийной конвекции подсакивает до 80% так, что его среднее значение равно 22%.

Результаты французских исследователей были воспроизведены канадскими [Peltier, Solheim, 1992] и обобщены на 3D случай американскими [Tackley et al., 1993] учеными. Повторяющиеся с интервалом 600-800 млн. лет массивные прорывы вещества из верхней мантии в нижнюю, чем-то похожие на сход с гор снежных лавин, получили название аваланшей (или аваланчей).

Следует уточнить, что хотя геохимии и видят верхнюю и нижнюю мантии как различные резервуары, они одновременно отслеживают и значительный обмен между этими резервуарами. [Hofmann, 1989] на основе Nb/U и Ce/Rb отношений нашел, что масса резервуара, из которого извлекаются элементы для формирования коры, составляет 35÷75% всей мантии. Такой же результат следует из анализа благородных газов и редкоземельных элементов. Массовый баланс, вычисленный [Allegre et al., 1986] для ^{40}Ar , показывает, что только 50% этого изотопа поступило в атмосферу Земли из верхней мантии (^{40}Ar -парадокс). Анализируя геохимические результаты, Хофманн обнаружил, что временные зависимости для всех элементов свидетельствуют о том, что длительные периоды постоянных изотопных отношений чередуются с короткими интервалами изменяющихся отношений. Периоды постоянных отношений хорошо объясняются существованием раздельной двухъярусной конвекции, а интервалы изменяющихся отношений соответствуют общемантийной конвекции. Хофманн назвал периоды интенсивного обмена МОМО-эпизодами (mantle overturn and major orogenies), т.е. мантийными переворотами.

В последнее время в связи с прорывами фазового барьера, обнаруженными при сейсмотомографии мантии, рис. 3, дискуссия о схемах конвекции возникла снова.

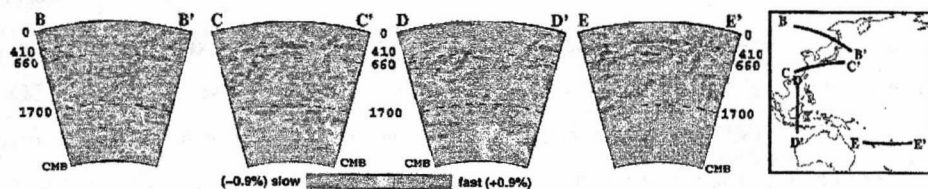


Рис. 3. Глубины погружения субдирируемых плит [Rubie, van der Hilst 2001]

В.П. Трубицын и В.В. Рыков [2002] полагают, что данные геохимии, которые отражают интегральный эффект за всё время эволюции, можно примирить с современными сейсмическими данными, если считать, что прежде конвекция в мантии была расслоенной, а сейчас из-за остывания Земли происходит переход к общемантийной конвекции.

В третьей главе приведены геологические и океанологические данные, воспроизведение и объяснение которых является основной целью моделирования. Самые крупные в истории Земли – суперконтинентальные циклы Вилсона – продолжаются 650-900 млн. лет. Было четыре полных цикла, и сейчас происходит пятый. На поверхности циклы Вилсона проявляются через образование и распад суперконтинентов, которым соответствует закрытие старых и раскрытие новых океанов. В работе В.Е. Хаина [2001] приводятся даты существования суперконтинентов: 1) эpiarхейского, 2,6 – 2,3 млрд. лет назад, 2) эпипалеопротерозойского, 1,65–1,35 млрд. лет назад, 3) Родинии, 1,0 – 0,8 млрд. лет назад и 4) вегенеровской Пангеи, 320 – 200 млн. лет назад.

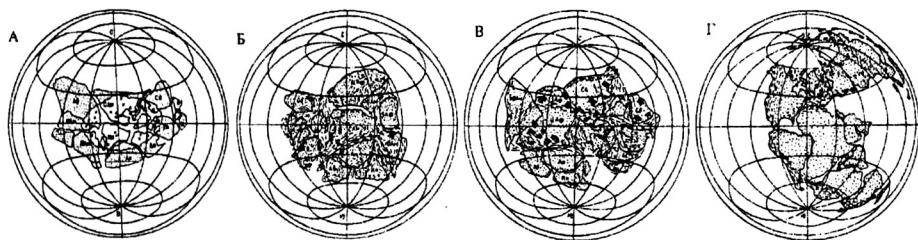


Рис. 4. Суперконтинентальная история Земли [Сорохтин, Ушаков, 1993].

А – Моногея, 2,6 млрд. лет назад. Б – Мегагея Штилле, 1,8 млрд. лет назад.

В – Мезогея (Родиния), 1,0 млрд. лет назад. Г – Пангея Вегенера, 200 млн. лет назад.

На рис. 4 приведены результаты из работы [Сорохтин, Ушаков, 1993]. Для реконструкции Моногеи использовались данные о распространении тиллитов и тиллоидов [Чумаков, 1978], а также поясов кеноранской орогении. Интересен вопрос происхождения покровного оледенения на поверхности Моногеи, расположенной в экваториально-тропической зоне. По мнению [Сорохтин Н.О., Сорохтин О.Г., 1997] это было высокогорное оледенение, что возможно только в случае высокого стояния первого суперконтинента. Впервые существование второго древнего суперконтинента (Мегагеи) предположил Г. Штилле в 1944 году, увидев

большое сходство в строении древних блоков, объединенных карельской орогенцией во время “альгонской революции” в конце раннего протерозоя. Одним из главных критериев для построения третьего суперконтинента Родинии служат складчатые пояса гренвилльской орогенции и данные о распространении следов покровных оледенений в позднем докембрии. Опираясь на палеомагнитные данные, надежно проводится реконструкция последнего суперконтинента в истории Земли – вегенеровской Пангеи, существование которой Вегенер предсказал еще в 1912 г.

Палеореконструкции показывают [Хаин, 2004], что природа океанов существенно различна. Океаны Атлантического типа формируются благодаря расколам континентов и по сути своей являются межконтинентальными. Возраст их жизни от момента образования до полного закрытия несколько меньший, чем продолжительность мегациклов, и не превышает 600 млн. лет. В настоящее время протекает первая половина этого цикла, поэтому возраст наших молодых океанов не превышает 150 млн. лет. Отметим, что раскрытие океанов Атлантического типа происходит по частям, границы которых совпадают с магистральными трансформными разломами, причем с остановками на разломах.

Иная ситуация наблюдается с Тихоокеанским сегментом Земли. Тихий океан является остатком единого Палеоокеана, который начал формироваться после распада Мегатеи около 1,5 млрд. лет назад, но окончательно сформировался только при образовании Родинии около 1 млрд. лет назад. О древности Тихого океана свидетельствует распространение офиолитов по периферии океана, причем возраст офиолитов возрастает по мере удаления от океана вглубь континентов. Палеогеографические реконструкции обрамления Тихого океана показывают, что трансгрессии на континенты неизменно приходили со стороны его современной акватории. Палеомагнитные данные говорят, что Пратихий океан существует на месте современного Тихого океана с начала палеозоя, а начиналось его формирование, вероятно, в протерозое. Эти принципиальные отличия тектонического строения и возрастов Атлантического и Тихого океанов подтверждаются геологическими данными [Пущаровский, 2001].

История палеозойских океанов началась с распада Родинии. На месте современной Северной Атлантики существовал океан Япетус, который зародился в

начале кембрия и унаследовал с некоторым смещением к западу и северу Протояпетус (Кельтский океан). Полное закрытие Япетуса произошло уже в конце силура, начале девона, в результате коллизии Лаврентии, Авалонии и Балтики и образования большого континента – Лавруссии.

Между северными и южными материками в широтном направлении простирался океан Тетис, развитие которого продолжалось до кайнозоя и отчасти ещё продолжается (Средиземное море) в настоящее время. Океан Палеотетис тянулся от Центральной Америки до Восточной Азии между Лавруссией, Таримом и Сино-Кореей на севере и Гондваной на юге.

В северном регионе Земли в течение палеозоя и мезозоя существовал Арктический океан. Более крупный Палеоазиатский океан располагался между Восточно-Европейским, Сибирским и Китайско-Корейским материками. История Палеоазиатского океана началась в ордовике, а заключительный этап его существования приходится на поздний палеозой и ранний триас, но в течение перми и триаса ещё сохранялся протяженный залив Мезотетис, ведущий к Тихому океану (тогда Панталассе). Он простирался от стыка Альп и Карпат на западе до Индо-Китая на востоке. В триасе произошел откол от Гондваны микроконтинентов и их северный дрейф к евразийскому борту [Казьмин, 1989], который замкнул Мезотетис и одновременно начал новую генерацию Тетиса-неотетиса, рис. 5.

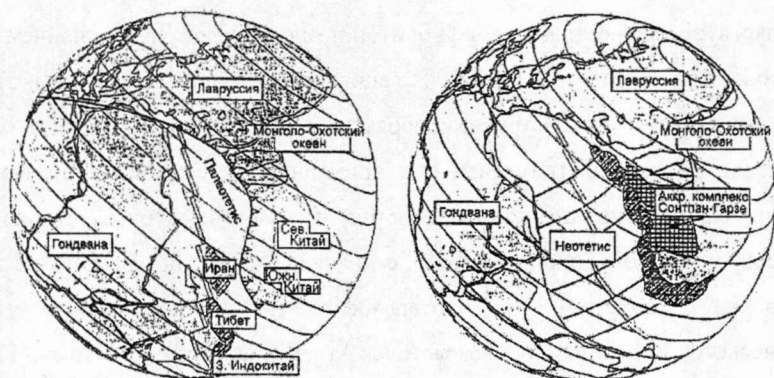


Рис. 5. Палеорекострукция океана Тетис от перми (слева) до триаса (справа). Раскрытие шло по трансформным разломам, ортогональным СОХ, окружности – палеошироты. [Besse et al., 1998].

Вторые по масштабности циклы, продолжительностью 175 млн. лет, которые, следуя Хаину, будем называть циклами Бертрана, соответствуют частичному закрытию крупных океанов, а также выражаются в раскрытии и последующем закрытии окраинных морей или малых океанских бассейнов – типа Уральского или Туркестанского океанов.

В фанерозойской истории Земли геологи выделяют порядка 20 орогенических фаз, которые проявляются в среднем через 30 млн. лет [Rampino, Caldeira, 1993]. Эту периодичность Н.Л. Добрецов [1997] назвал “главной геологической периодичностью”. В честь геолога, установившего канон орогенических фаз, В.Е. Хаин предложил именовать их циклами Штилле. Эти циклы выражаются в перестройках направления и скорости смещения литосферных плит, в скачкообразном перемещении зон спрединга и субдукции, в неравномерности вулканизма и метаморфизма. Циклы Штилле реализуются на ограниченном пространстве между островной дугой и континентом, либо между двумя соседними островными дугами. Установлено отчетливое соответствие между циклами Вилсона, Бертрана и Штилле и иерархически вложенными друг в друга геодинамическими системами М.А. Гончарова 1-го, 2-го и 3-го ранга.

В настоящее время известно также [Лобковский и др., 2004], что мантийная динамика реализуется одновременно двумя способами: непрерывно действующей тектоникой плит и импульсно действующей тектоникой мантийных плюмов. Доминирующей является тектоника плит, плюм-тектоника сравнивается с ней только в периоды своей активности. Плюмы всплывают наверх, как будто не замечая мантийную конвекцию, как такое возможно признается загадкой, Земля – это единая система, поэтому необходимо найти единые причины, объясняющие и тектонику плит, и тектонику мантийных плюмов. Термическая модель позволяет объяснить только тектонику плит, но при этом не получают объяснения внутриплитные объекты – океанические поднятия, горячие точки, трансформные разломы. Возможно, что единые объяснения удастся получить в рамках более широкой термохимической модели. Эти надежды подкрепляют физические эксперименты сибирских ученых. Опыты А.Г. Кирдяшкина с водой и парафинами подтверждают теорию нижнемантийных плюмов. Согласно теории Н.Л. Добрецова

источниками плюмов являются мантийные воронки на границе ядро-мантия, в которых происходят химические реакции с участием водорода. В них образуются легкоплавкие компоненты, понижающие температуру плавления нижнемантийного вещества, благодаря чему поддерживается питающий канал и происходит подъем термохимического плюма.

В четвертой главе дается обоснование и математическая формулировка термохимической модели мантийной конвекции. Модель формулируется в приближении Буссинеска, с ограничением на плотность $\rho = \rho_0 + \delta\rho$, $\delta\rho \ll \rho_0$. Вариации плотности $\delta\rho = \delta\rho_{th} + \delta\rho_{ch} + \delta\rho_{ph}$ складываются из термических, химических и фазовых изменений и описываются в линейном приближении

$$\delta\rho_{th} = -\rho_0 \cdot \alpha \cdot T, \quad \delta\rho_{ch} = -\rho_0 \cdot \beta \cdot C, \quad \delta\rho_{ph} = -\rho_0 \cdot \gamma \cdot \chi(r - r_{ph}),$$

где α , β и γ – коэффициенты температурного, химического и фазового расширения мантийного вещества. Эндотермический фазовый переход, происходящий в тонкой зоне, моделируется поверхностью разрыва и описывается ступенчатой функцией Хевисайда $\chi(r - r_{ph})$. Вертикальная сила, которая препятствует пересечению фазовой границы, вычисляется в линейном приближении (т.е. пропорциональна смещению границы $r_{ph} - r_{ph}^0$) и сносится на невозмущенное положение границы.

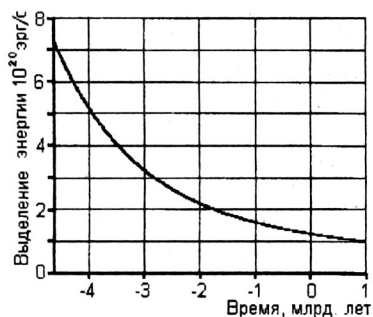


Рис. 6. Выделение радиогенной энергии

учитывается, по О.Г. Сорохтину, экспоненциально спадающий вклад радиоактивных долгоживущих элементов (^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th и ^{40}K), рис. 6. Следует отметить, что в настоящее время с помощью регистрации частиц радиоактивного распада антинейтрино начаты прямые измерения интенсивности радиоактивного излучения Земли [Calaprice et al., 1998]. Увеличение сети детекторов античастиц позволит определить распределение уран-ториевых элементов внутри планеты.

Планетезимали образовывались в первые миллионы лет и одновременно разогревались до температуры плавления короткоживущим ^{26}Al , время полураспада которого равно 0.72 млн. лет. Этот разогрев учитывается горячим начальным состоянием планеты. В процессе эволюции

Модель физико-химической дифференциации вещества в переходном слое D" на границе ядро-мантия предполагает плавление металлических компонент мантийного вещества (железа и никеля) и стекание некоторой части этого расплава в жидкое ядро. При этом одновременно происходит рост земного ядра, уменьшение толщины мантии и образование легкого вещества. Считается, что стекание расплавившихся компонент возможно только из тонкой мантийной зоны, непосредственно прилегающей к жидкому ядру. В расчетах толщина этой зоны равнялась размеру одной расчетной ячейки. Оба события – плавление и стекание – считаются быстрыми, что при дискретной численной реализации соответствует одному шагу по времени. Такая модель процесса дифференциации легко реализуется в численных экспериментах посредством анализа на каждом временном слое температуры в узлах расчетной сетки, прилегающих к ядру. Если текущее значение превышает температуру плавления T_{melt} , то концентрации в этом узле присваивается модельное значение C_{light} . Увеличение радиуса ядра находится из баланса массы, а температура ядра – из условия теплового баланса на границе ядра и мантии.

Концепция внешней дифференциации исходит из того, что при всплытии горячего мантийного вещества в результате падения давления активизируются процессы распада химических соединений. Вещество разделяется на тугоплавкий кристаллический скелет и магматические расплавы, заполняющие поры, и осуществляется фильтрация легкой магмы [Каракин, Лобковский, 1982; Richter, McKenzie, 1984; Котелкин и др. 1979; 1986; 1990]. Плотность всплывающего вещества падает при этом с $3.3 \cdot 10^3$ кг/м³ до $3.0 \cdot 10^3$ кг/м³. В модели постулируется, что при выполнении трех условий: достаточно высокой температуры $T > T_{\text{crust}}$, падении давления ниже определенного уровня $h \approx h_{\text{crust}}$ и всплытии вещества $v_r > v_{\text{crust}} > 0$, на внешней поверхности происходит образование коровых частиц. При последующем погружении разуплотненного вещества в зонах субдукции на глубине 80-100 км происходит обратное уплотнение материала, которое называют процессом эклогитизации (фазовый переход “габбро-эклогит”). Причем при погружении вещества происходит более значительное изменение плотности с $3.0 \cdot 10^3$ кг/м³ до $3.5 \cdot 10^3$ кг/м³ [Ringwood, Green, 1966], чем при всплытии. Генерация тяжелого вещества моделировалась посредством анализа на каждом временном слое

ситуации в узлах расчетной сетки, расположенных на заданной глубине эволютизации h_{ecl} . Если значение радиальной скорости $v_r < 0$, то концентрации присваивается значение C_{ecl} .

За масштаб длины принят радиус Земли, а за характерный масштаб скорости – $v_* = 1$ см/год, тогда масштаб времени – $t_* = 638$ млн. лет ($t_* = l_*/v_*$). За характерные масштабы величин взяты их земные значения [Machetel, Weber, 1991]:

$$l_* = 6.38 \cdot 10^6 \text{ м}; \quad v_* = 3.2 \cdot 10^{-10} \text{ м/сек}; \quad t_* = 2 \cdot 10^{-16} \text{ сек}; \quad g = 10 \text{ м/сек}^2; \quad \rho_0 = 4200 \text{ кг/м}^3;$$

$$\kappa = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{сек}; \quad T_* = 4000^\circ\text{C}; \quad \alpha = 1.4 \cdot 10^{-5}/\text{град}; \quad c_p = 1.25 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{град});$$

$$\delta\rho_{\text{th}} = 200 \text{ кг/м}^3; \quad \delta\rho_{\text{ph}} = 400 \text{ кг/м}^3; \quad \delta\rho_{\text{ecl}} = 70 \text{ кг/м}^3; \quad \delta\rho_{\text{light}} = 200 \text{ кг/м}^3;$$

$$\eta = 0.5 \cdot 10^{22} \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{сек}); \quad \gamma = -4 \text{ МПа/град}; \quad t_h = 2.9 \text{ млрд. лет.}$$

Основные уравнения модели в безразмерных переменных имеют вид

$$\bar{\nabla} \cdot \bar{\nabla} = 0,$$

$$\bar{\nabla} p = Ra (T + C + \phi \cdot \chi(r - r_{\text{ph}})) \bar{e}_r + \Delta \bar{V}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot \bar{\nabla} T = \frac{\Delta T}{Pe} + Q \cdot T \cdot v_r \cdot \frac{d\chi(r - r_{\text{ph}}^0)}{dr} + H(t)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot \bar{\nabla} C = 0 \quad \text{и} \quad C = \begin{cases} C_{\text{light}} : r = r_c, & T > T_{\text{melt}} \\ C_{\text{ecl}} : r = r_{\text{ecl}}, & v_r < 0 \end{cases}$$

где искомые функции \bar{V} , p , T , C – соответственно скорость, динамическое давление, температура и концентрация. Замыкают модель уравнения для радиуса r_c и теплосодержания i_c ядра

$$\frac{dr_c}{dt} = \frac{K_{\text{ch}}}{r_c^2} \frac{\sum (C_{\text{light}} - C)}{dt}, \quad \frac{di_c}{dt} = K_T \oint \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r_c} ds$$

и формулы

$$T_c = \Lambda_T i_c / r_c^3, \quad r_{\text{ph}} = r_{\text{ph}}^0 + \Gamma \cdot (T(r_{\text{ph}}^0) - T_{\text{ph}}^0), \quad H(t) = H_0 \exp(-\Lambda_h t).$$

для температуры ядра T_c , границы фазового перехода r_{ph} и $H(t)$

Критерии подобия термохимической модели

$$Ra = \rho_0 g \alpha T_* l_*^2 / (\eta v_*), \quad Pe = l_* v_* / \kappa - \text{числа Рэлея и Пекле};$$

$$\Phi = \delta\rho_{\text{ph}} / \delta\rho_{\text{th}}, \quad Q = \gamma T_{\text{ph}} \delta\rho_{\text{ph}} / (\rho_0^2 T_* c_p), \quad \Gamma = \gamma T_* / (\rho_0 g l_*) - \text{фазовые параметры};$$

$$K_{\text{ch}} = \delta\rho_{\text{ch}} v_i (4\pi l_*^3 \rho_c), \quad K_T = 3\kappa / (4\pi l_* v_*), \quad \Lambda_T = \rho_0 c_p / (\rho_c c_p^*), \quad H_0 = h_0 t_* / (c_p T_*), \quad \Lambda_h = \lambda_h t_h -$$

коэффициенты динамики ядра и подвода тепла.

Граничные условия, которым должны удовлетворять температура, скорость и касательные напряжения τ , задаются в традиционном виде

$$r=r_c: T=T_c, v_r=0, \tau=0 \quad \text{и} \quad r=1: T=0, v_r=0, \tau=0.$$

Для исследования эволюции мантийного слоя необходимо также определить начальные распределения температуры и концентрации. Осредненная начальная температура мантии при проведении численных экспериментов в большинстве случаев задавалась в экспоненциальном виде

$$t = 0: T(r) = T_c \exp[A \cdot (r_c - r)],$$

который при $A=16$ дает радиальное распределение температуры, близкое к оценке состояния планеты после аккреции [Витязев и др., 1990]. Небольшие начальные возмущения температуры распределялись в мантии случайным образом. Эклогиты, легкая компонента и частицы корового вещества в начальный момент отсутствовали.

В пятой главе дан строгий вывод двумерного варианта термохимической модели для экваториальной плоскости с учетом шаровой искривленности мантии, и приводятся результаты такого 2D-моделирования (на сетках 129×1024 и 257×2048 узлов). Известно, что термический фактор постоянно поддерживает мантийную конвекцию, а эндотермический фазовый переход с таким же постоянством препятствует перемещению вещества. Исследование показало, что, в отличие от названных факторов, химические процессы оказывают на конвекцию переменное влияние. Когда образуется неустойчивая химико-плотностная конфигурация (легкая компонента снизу, а тяжелая – сверху), то химический фактор ускоряет конвекцию вместе с термическим фактором. После всплытия легкого и погружения тяжелого вещества, когда образуется устойчивая конфигурация плотности, химический фактор начинает препятствовать термической конвекции и вместе с фазовым барьером способствует замедлению движения и расслоению мантии. Поэтому в термохимической модели имеются возможности для раскачивания геодинамического процесса. Химические процессы, поочередно ускоряя и тормозя термическую конвекцию, придают движению циклический характер, причем резко нелинейный, поскольку химическая активность сильно зависит от температуры и подвода реагентов. Эти свойства термохимической конвекции проявляются более

явно, если увеличить концентрации компонент C_{ec1} и C_{light} , рис. 7. Поэтому термохимическая геодинамика проявляет сложный многоциклический

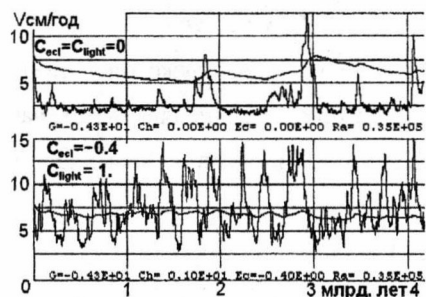


Рис. 7. Усиление нелинейного характера термической конвекции (снизу) процессами эклогитизации и дифференциации.

зон субдукции, рис. 8. Эти модельные события отвечают (главной геологической периодичности) циклам Штилле. В частности, поглощение длинной ячейкой короткой соседней ячейки описывает присоединение к континенту островной дуги.

характер, разобраться в природе которого помогла детальная визуализация полной динамической картины численных экспериментов. Самым частым повторяющимся событием является слияние конвективных ячеек в верхней мантии, при визуализации плотности это событие выглядит как слияние



Рис. 8. Слияние конвективных ячеек и зон субдукции в верхней мантии

Более значительная активизация движения происходит во время аваланшей, т.е. прорывов в нижнюю мантию холодных эклогитовых масс, рис. 9. Визуализация движений, сопровождающих эти прорывы, свидетельствует, что они по своему действию отвечают геологическим циклам Бертрана (175 млн. лет), в частности, производят горизонтальные перемещения вещества на внешней поверхности,

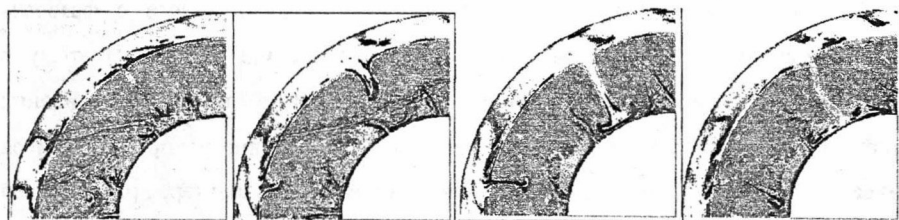


Рис. 9. Аваланш и горизонтальные перемещения вещества верхней мантии.

эквивалентные закрытию малых или частичному закрытию больших океанов. Рис. 9 хорошо соответствует данным сейсмоотографии, приведенным на рис. 3.

Основным результатом моделирования в экваториальной плоскости стало открытие глобальных мантийных переворотов, или сокращенно овертонов, которые своей периодичностью, 650-900 млн. лет, и действием, закрытием океанов и сборкой суперконтинентов, отвечают циклам Вилсона.

Результаты пространственного моделирования овертонового варианта эволюции Земли приводятся и анализируются в **шестой главе**. Для проведения такого исследования потребовалось затратить массу усилий на создание, отладку и тестирование программ, реализующих 3D-вариант термохимической модели. Вычисления проводятся в декартовых координатах, т.е. шаровой слой вложен в кубическую сетку (257x257x257 узлов). Конечно-разностная аппроксимация уравнений имеет второй порядок, граничные условия на сферических поверхностях удовлетворяются с точностью первого порядка. Результаты приводятся для случая, когда критерии подобия равны

$Ra=87500$, $Pe=1860$, $\phi=2$, $\Gamma=.069$, $Q=-.04$, $C_{ec1}=-.2$, $C_{light}=.5$, $\Lambda_h=.333$, $H_0=.001$,

что соответствует, в частности, размерным значениям физических величин

$\delta\rho_{th}=200\text{кг/м}^3$, $\delta\rho_{ph}=400\text{кг/м}^3$, $\delta\rho_{ec1}=140\text{кг/м}^3$, $\delta\rho_{light}=300\text{кг/м}^3$, $\gamma=-4.4\text{МПа/град}$.

Эклогиты, легкое и коровое вещество в начальный момент отсутствовали. Случайные возмущения задавались с уплотнением у плоскости эклиптики.

На рис. 10 показаны интегральные результаты численного моделирования, которые своими пиками геодинамической активности оказались в замечательном согласии с эмпирическими данными [Condie, 1998] по темпам роста ювенильной коры и образованию суперконтинентов, рис. 11. На рис. 10 видно также, что средняя температура мантии падает ступенчатым образом именно во время овертонов, причем это падение слабеет с каждым разом. После первого овертона температура мантии падает примерно на 20%. Рост ядра и объема коры также демонстрируют убывающий ступенчатый характер, причем основная часть корового вещества образуется сразу после первого овертона. Ступенчатый характер виртуального процесса хорошо объясняет скачки или МОМО-эпизоды, происходившие в ходе реальной эволюции Земли. Такие скачки зафиксированы геохимиками [Stein,

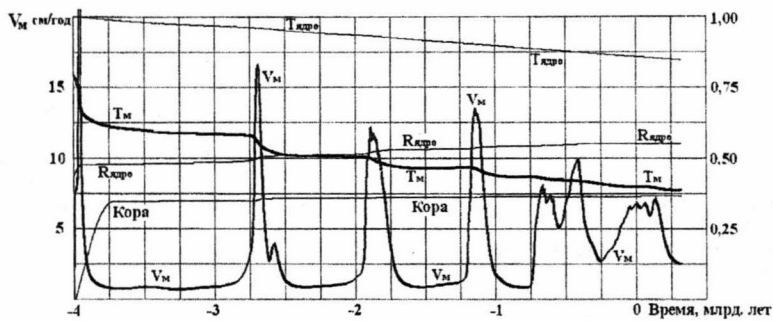


Рис. 10. Интегральные характеристики эволюционного процесса

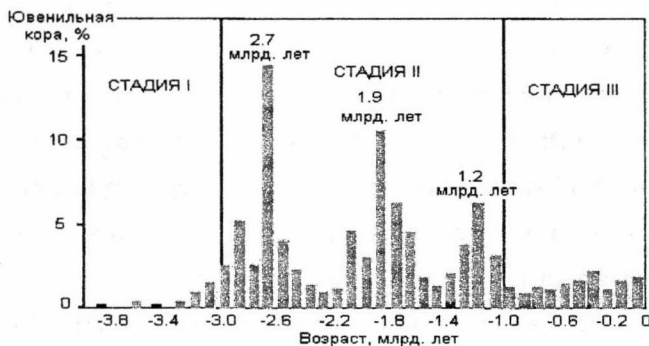


Рис. 11. Данные по образованию ювенильной коры и суперконтинентов [Condie, 1998]

Hofmann, 1994] по изотопным отношениям, редким элементам и благородным газам. Температура ядра при этом убывает с почти постоянной скоростью.

Исследовать детали численного эксперимента помогают специальные визуализации, которые показывают общие возмущения плотности. Для передачи пространственного эффекта используется подсветка со стороны наблюдателя. 3D-визуализация показывает обмен веществом между верхней и нижней мантией (т.е. плюмы и аваланши), наблюдатель находится в плоскости эклиптики. Видеозаписи эксперимента помещены в Интернете <<http://rjes.wdcb.ru/v06/tje04165/tje04165.htm>>.

Рис. 12 иллюстрирует (рисунки даны в естественной цветовой шкале) стартовый этап эволюции. Неустойчивое начальное состояние мантии (слева) сменяет сильнейший переворот в форме кубической конвекции (в центре), уже во время которого рождается основная масса коровых частиц. Эти частицы консолидируются в виде мощных сгустков над нисходящими потоками (справа).

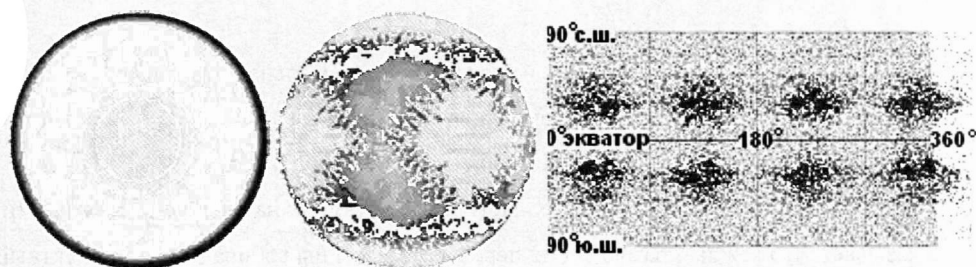


Рис. 12. Начальное состояние (в экваториальном сечении), 3D-вид стартового переворота и образование континентальных щитов на поверхности Земли.

В дальнейшем наблюдается циклический режим эволюции, в котором главными событиями являются мантийные перевороты. Овертоны имеют характерную пространственную структуру, которую иллюстрируют рис. 13-15.

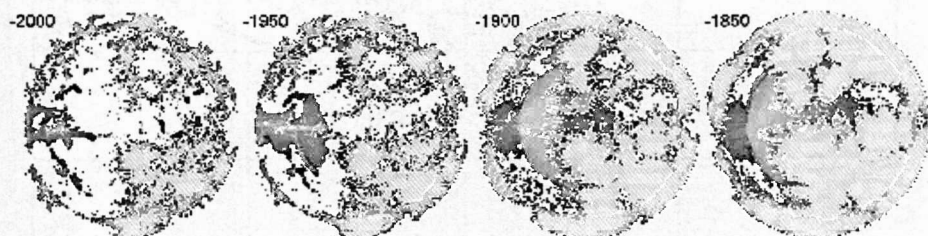


Рис. 13. 3D-динамика мантийного переворота (третий овертон)

На рис. 13 показано образование прорыва, погружение и растекание по поверхности ядра тяжелого вещества, а также формирование астеносферы из легкого горячего

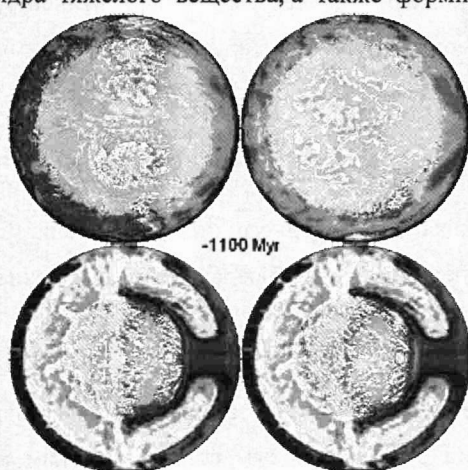


Рис. 14. Четвертый овертон, 2S-вид.

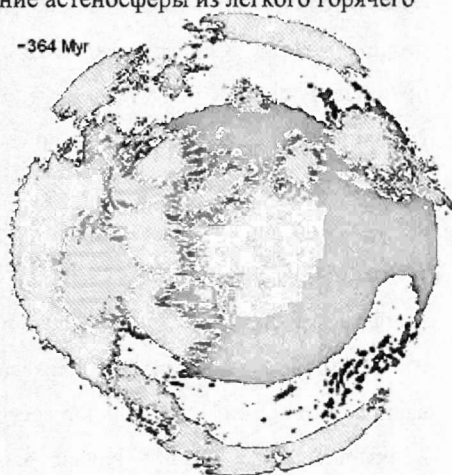


Рис. 15. Пятый овертон, 3D-вид.

вещества, поступающего из нижней мантии. Выразительная картина переворота наблюдается во время четвертого овертона в экваториальном сечении, показанном на рис. 14 снизу (сверху показаны северное и южное полушария)

Визуализация динамики коровых частиц, дрейфующих на внешней поверхности, показывает, что каждый раз во время переворота частицы собираются в компактный сгусток над нисходящей струей. Формы и места расположения суперконтинентов

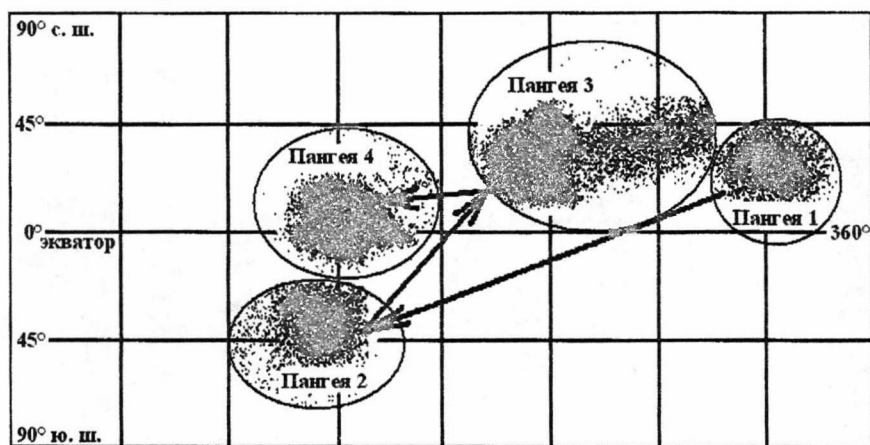


Рис. 15. Динамика коровых частиц и образование суперконтинентов

показаны на рис. 15. Видно, что второй суперконтинент в этом эксперименте образуется на противоположной, по отношению к первому суперконтиненту, стороне Земли. Каждый следующий суперконтинент формируется между двумя предшествующими так, что перемещение континентальных масс с каждым циклом уменьшается, а местоположение суперконтинента стабилизируется. Это обстоятельство вместе с дипольной конфигурацией овертонов объясняет наблюдаемую асимметрию внешнего облика и внутреннего строения Земли. С течением времени в численных экспериментах наблюдается вырождение глобальных мантийных переворотов в региональные аваланши.

Сравнение с эмпирическими данными подтверждает овертоно-циклический вариант эволюции. 1) Начальное состояние, необходимое для запуска этого режима, и активный рост ядра в начале эволюции отвечают новым астрофизическим и космохимическим данным о быстрой горячей аккреции с ранним выделением ядра.

2) Виртуальный процесс начинается с сильнейшего овертона. Данные по геохимии и изотопии раннеархейских коматиитов и базальтов также свидетельствуют [Конди, 1983; Никишин и др., 1992; Windley, 1984], что около 4 млрд. лет назад мощная тепловая волна, пришедшая из глубины планеты, достигла верхней мантии и привела к ее частичному плавлению. 3) Кубическая форма стартового переворота согласуется с наличием на материках эократонов, а исключительная сила переворота – с мощностью древних щитов, представляющих большую часть всей коры. 4) В эксперименте воспроизводится самая длительная архейская эпоха эволюции Земли. 5) Постархейский овертон сопровождался самыми большими скоростями, и поэтому первый суперконтинент был самым высоким, что подтверждается первым в истории Земли почти глобальным Гуронским оледенением. 6) Модельная динамика коровых частиц воспроизводит данные исторической геологии не только по фактам, но и по датам образования суперконтинентов. 7) В численном эксперименте наблюдается описанный Конди феномен образования второго суперконтинента на противоположной стороне Земли (“обломки первого суперконтинента стекают, стягиваются в область нисходящего мантийного течения”). 8) Дипольная конфигурация овертонов в экспериментах подтверждается асимметрией внешнего облика Земли. 9) Стабилизация положения овертонов и их конфигурация согласуются с фиксированным расположением и древним возрастом Тихого океана. 10) Размещение дипольной структуры в плоскости экватора подтверждается также значительным различием экваториальных моментов инерции планеты. 11) Об образовании во время переворота необычайно мощной нисходящей струи свидетельствует реконструкция вегенеровской Пангеи [Nikishin et al. 2002], на которой зафиксировано очень четкое субдукционное кольцо, диагностирующее наличие под суперконтинентом гигантского стока. 12) Масштабность модельных переворотов соответствует терминам “альгонская революция” и “всеземная регенерация”, которыми Штилле характеризовал процесс объединения древних блоков в конце раннего протерозоя. 13) Обусловленность циклов Бертрана региональными прорывами фазового барьера подтверждают данные сейсмотомографии мантии. 14) Слияние конвективных ячеек в верхней мантии по своей частоте и действию совпадает с циклами Штилле.

Анализ результатов. Возникает принципиальный вопрос, каковы причины мантийных переворотов? В рамках термической конвекции было установлено, что эндотермический фазовый переход приводит к появлению аваланшей. В данной работе показано, что добавление химических процессов значительно усиливает цикличность и нелинейность геодинамического процесса. Поскольку скорости химических реакций сильно зависят от температуры и подвода реагентов, который осуществляется конвективным путем, то возможно взаимное термо-химико-конвективное усиление активности. Именно во время переворотов достигается максимальная сонаправленность термической конвекции с процессами дифференциации, происходящими на границах мантийного слоя. А после активной конвективной фазы, когда легкое вещество всплыло наверх, а тяжелые эклогиты переместились на дно, фактор химической плавучести вместе с эндотермическим фазовым переходом тормозит конвекцию в мантии, процессы дифференциации замедляются или прекращаются совсем.

Различие химического состава помогает преодолевать эндотермический барьер на отметке 670 км и учащает перемежающийся пульс мантийной конвекции. Аваланши (которые в термической модели связывают с циклами Вилсона) в термохимической модели соответствуют геологическим циклам Бертрана (175 млн. лет). Только в критически дифференцированной мантии возможно нелинейное усиление прорыва до глобального масштаба, при котором конвекция самоорганизуется в общемантийный переворот. Следует подчеркнуть, что одной заключенной в модели возможности нелинейного взаимодействия всех факторов еще не достаточно для осуществления овертонового режима эволюции. Необходимым условием запуска этого режима является акцентированный первотолчок, который в нашем эксперименте обеспечивает неустойчивое равновесное начальное состояние планеты. Только процесс, начинающийся с мощного переворота, попадает на овертоновую ветвь эволюции.

Существенное различие между овертоном и аваланшем видится в том, что овертон представляет собой систему конвективных ячеек, которые покрывают всю мантию и активно конкурируют между собой в захвате вещества. Вследствие чего формируются акцентированные границы конвективных ячеек, и образуются

протяженные системы коллизионных поясов и СОХ, т.е. происходит разбивка поверхностного слоя на литосферные плиты. Прорывы, происходящие в недостаточно дифференцированной мантии, вырастают только до регионального масштаба. Авананши и плюмы характеризуются резким увеличением скорости лишь в ярко выраженной центральной части, т.е. у авананшей и плюмов нет собственной внешней границы, в роли последней выступают конвективные границы вмещающей ячейки. Поэтому можно говорить, что плюмы вмонтированы в тектонику плит посредством общих внешних границ. Таким естественным образом, в рамках термохимической модели мантийной конвекции реализуются одновременно и тектоника плит, и тектоника плюмов. Благодаря нелинейному усилению, плюмы всплывают наверх “как бы не замечая” тектонику плит. А в периоды затишья химической активности на передний план выходит постоянно действующая тектоника плит.

Численные эксперименты отражают важное топологическое свойство конвекции в шаровом слое: на погружение вещества требуется затратить больше усилий, чем на всплытие (эффект “заклинивания”). Это свойство проявляется в типичной конфигурации овертонов – один суперсток и 3-5 восходящих суперплюмов. Выполняется известный вариационный принцип механики – принцип минимальных затрат энергии. Коллективное погружение вещества энергетически является более выгодным. Таким образом, сферическая геометрия мантийного слоя способствует реализации течений с общим стоком, необходимым для сборки суперконтинента.

Анализ поверхностной динамики корового вещества, который свидетельствует, что глобальные мантийные перевороты в состоянии собирать суперконтиненты и закрывать океаны, одновременно показывает, что такой “сборки материков” проблематично добиться иными средствами [Котелкин, Лобковский, 2005, 2006, 2007]. В частности, объединение континентов в результате дрейфа без многократного увеличения скорости не обеспечит эффект высокого стояния суперконтинента. Овертоновый режим дает убедительное объяснение циклам Вилсона, результат может улучшиться еще, если ввести обратное влияние коры на мантийную конвекцию и учесть экранирующий эффект, который способствует распаду суперконтинентов [Trubitsyn, 2004; Trubitsyn V.P., Trubitsyn A.P., 2005].

Наряду с глобальными циклами при термохимическом моделировании воспроизводятся также циклы Бертрана и Штилле.

В седьмой главе приводятся результаты 3D-экспериментов, моделирующих образование океанических поднятий и объясняющих природу трансформных разломов. Эти исследования регионального масштаба выполнены в прямоугольной расчетной области с применением более мелкой сетки, позволяющей получить необходимую детализацию структуры мантийной конвекции. Развитая вынужденная термическая конвекция в верхней мантии моделировалась на равномерной сетке, содержащей $513 \times 385 \times 65$ узлов, что дает шаг сетки 10.5 км. Для формирования основного течения в виде продольной циркуляции на нижней границе расчетной области задавалось линейное распределение температуры, рис. 17.

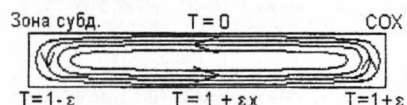


Рис. 17. Основное течение – вынужденная конвекция в верхней мантии

Моделирование показало, что на фоне основного продольного течения при больших числах Рэлея возникают вторичные поперечные течения в форме валиковой конвекции

[Вержбицкий и др., 2007]. Поэтому суммарное движение вещества происходит по сложным винтовым траекториям, в результате чего в потоке образуются ярко выраженные продольные структуры, соответствующие холодным и горячим границам вторичных валиковых течений, рис. 18. Горячие валиковые границы

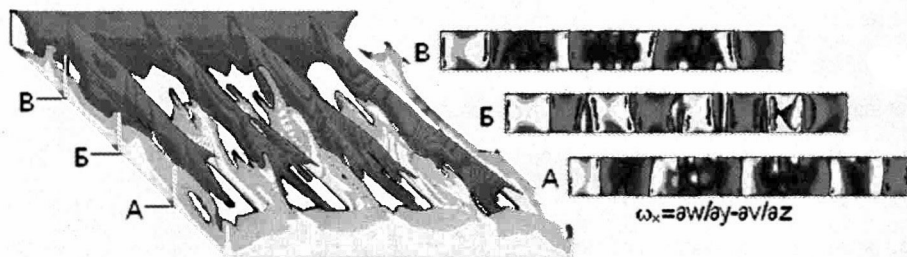


Рис. 18. 3D-распределение температуры при $Ra=10^7$. Продольная завихренность (справа) иллюстрирует валиковый характер вторичных течений

(красные оттенки) аккуратно разрезают верхнюю мантию на прямолинейные части, и одновременно холодные зоны (синие), располагающиеся в центрах этих частей,

служат для них своеобразными “ребрами жесткости”. Таким образом, в силу закономерностей конвекции и термоупругости верхняя мантия оказывается разбитой на блоки. С позиций механики сплошных сред становится понятно как происхождение трансформных разломов, так и наблюдаемое раздельное перемещение участков океанического дна вдоль этих разломов.

Для объяснения образования и динамики океанических поднятий было проведено моделирование подъема плюма химической природы и его взаимодействия с термической конвекцией в верхней мантии, рис. 19. Всплытие прорвавшегося из нижней мантии через фазовый барьер легкого вещества индуцирует строго определенную конвекцию в верхней мантии. Растекающееся легкое вещество порождает (рис. 19а) и движет перед собой (рис. 19б) зоны субдукции. После исчерпания потенциала химической конвекции продолжается термическая конвекция, под действием которой всплывшее вещество делится на части, растекание которых ограничено зонами субдукции (рис. 19в). Таким образом, легкое вещество оказывается зажатым термической конвекцией со всех сторон, что создает условия для образования компактных океанических поднятий.

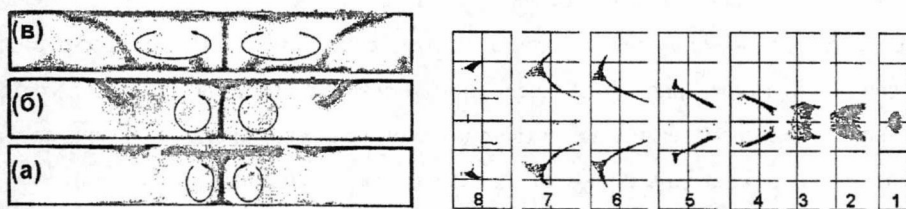


Рис. 19. Деление термической конвекцией всплывшего легкого вещества
 (а) – легкое вещество (серого цвета) всплыло на поверхность,
 (б) – легкое вещество растекается и индуцирует термическую конвекцию,
 (в) – термическая конвекция делит легкое вещество на две части,
 (1-8) – вид сверху на поверхностный дрейф (справа налево) легких частиц.

В пространственном случае описанной выше термической конвекции (рис. 18) наблюдается поверхностная динамика легкого вещества, представленная на рис. 19(1-8). Сгусток всплывающих легких частиц начинает дрейфовать согласно вынужденной циркуляции, увеличиваясь в размерах и вытягиваясь в направлении движения, и одновременно происходит разделение частиц на две группы. Таким экспериментом можно объяснить происхождение поднятий Шатского и Хесса,

которые располагаются в северо-западной части Тихого океана примерно симметричным образом по разные стороны от Императорского хребта [Котелкин и др., 2004; Вержбицкий и др., 2006].

Для объяснения крупных семейств одновозрастных океанических плато и траппов, наблюдаемых на поверхности, было проведено исследование взаимодействия термохимического плюма с фазовым барьером. Это региональное моделирование выполнено на расчетной сетке, содержащей 385x385x129 узлов. Начальное состояние региона – невозмущенное, и с границы ядро-мантия (из слоя D'') происходит локализованное в пространстве и во времени поступление порции легкого вещества, имитирующее нижнемантийный плюм. Типичный результат численных экспериментов такого рода представлен на рис. 20 в виде пространственных конфигураций всплывающего вещества. Плюмовое вещество однородно, но для наглядности ему по мере всплытия придаются различные оттенки, светлые тона соответствуют положениям вещества в нижней мантии, а темные – в верхней. Вещество начинает всплывать вертикально вверх, на рис. 20а и 20б видна питающая плюм тонкая ножка и растекающаяся вдоль фазовой границы 670 км шляпка плюма. В этот момент подпитка плюма снизу была прекращена, наблюдается дальнейшее растекание вещества, рис. 20в, и затем формируется кольцевая структура, рис. 20г. После чего осевая симметрия уступает место локальным прорывам легким веществом фазового барьера, рис. 20д, и рождается семейство верхнемантийных плюмов. Рис. 20е и 20ж показывают дальнейший

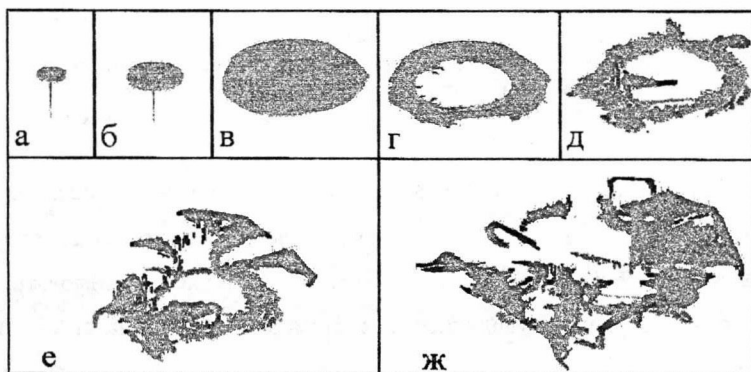


Рис. 20. Дробление нижнемантийного плюма фазовым переходом

подъем легкого вещества в верхней мантии и его растекание вдоль внешней поверхности. Таким образом, при моделировании имеет место дробление нижнемантийного плюма эндотермическим фазовым переходом на семейство верхнемантийных плюмов. Этот результат согласуется с наблюдаемыми семействами близковозрастных океанических плато Онтонг-Джава, Манихики и трапповых провинций Восточно-Марианской, Науру и Пигафетта [Larson, 1997], с излияниями Сибирских и Тунгусских пермо-триассовых траппов. Поэтому можно сделать вывод, что одной из основных причин образования семейств океанических плато и траппов является фазовая граница между верхней и нижней мантией. Расчеты показывают также, что более мощные плюмы, такие как исландский, в состоянии преодолеть фазовый барьер без дробления.

На основании результатов региональных экспериментов можно констатировать, что термохимическая модель позволяет успешно воспроизводить не только тектонику плит, но и тектонику плюмов.

Заключение. По результатам численных экспериментов на термохимической модели можно сделать следующие выводы.

Термическая составляющая постоянно поддерживает мантийную конвекцию, формирует её ячеистую структуру и отвечает за тектонику плит.

Эндотермический фазовый переход тормозит вертикальное движение, придает конвекции перемежающийся характер и ведет к расслоению мантии.

Химические процессы, нелинейным образом зависящие от температуры и подвода реагентов, придают движению импульсно-циклический характер.

Термо-химико-конвективное взаимодействие выражается в форме мантийных плюмов и значительно усиливает нелинейный характер конвекции. Тектоника плюмов вложена в тектонику плит так, что внешними границами плюма служат границы термической ячейки, и плюм эффективно подпитывается всей ячейкой.

При раздельной двухъярусной конвекции с интервалом 30-40 млн. лет происходят перестроения конвективных ячеек в верхней мантии, они сопровождаются слиянием зон субдукции и объясняют закрытие окраинных морей и присоединение островных дуг к материкам (циклы Штилле).

Прорывы, происходящие в слабо стратифицированной мантии, усиливаются только до аваланшей регионального масштаба. Такие аваланши повторяются через 170÷200 млн. лет, что объясняет данные сейсмотомографии. Они вызывают перемещения масс, приводящие к закрытию малых или частичному закрытию больших океанов (циклы Бертра).

Главный вывод. В критически дифференцированной мантии возможна глобальная самоорганизация конвекции в энергичный общемантийный переворот (овертон). Мантийные перевороты являются веховыми событиями эволюции Земли, они определяют циклы Вилсона в 650÷900 млн. лет, закрывают прежние океаны и производят сборку суперконтинентов. Во время овертонов происходит переформирование срединно-океанических хребтов и коллизионных поясов.

Овертоно-циклический режим мантийной конвекции хорошо воспроизводит основные события геологической истории Земли и объясняет логическую связность и закономерность всей цепи событий.

Для запуска овертонового режима эволюции необходим акцентированный первотолчок, его обеспечивает неустойчивое начальное состояние, в котором планета оказывается в результате быстрой аккреции.

Первый и второй стоки и суперконтиненты располагаются на противоположных сторонах Земли, последующие стоки и суперконтиненты располагаются между предыдущими. Поэтому, начиная с третьего цикла Вилсона, начинает формироваться дипольная структура планеты с континентами в одном полушарии и крупным устойчивым (Тихим) океаном – в другом. Импульсно-периодический характер конвекции приводит к тому, что процесс эволюции носит ступенчатый характер. Прирост коры и ядра, остывание мантии во время переворотов происходят ускоренными темпами. Вследствие остывания вещества активность всех процессов уменьшается и овертоны вырождаются в аваланши.

Региональное термохимическое моделирование объясняет причины и механизм образования характерных океанических структур.

На фоне вынужденной термической конвекции в верхней мантии образуются вторичные валиковые течения. Горячие границы валиковых течений делят мантию на части и проявляются в виде трансформных разломов, а холодные зоны укрепляют

эти части и превращают их в целостные блоки, которые перемещаются с относительным сдвигом.

Учет взаимодействия вынужденной термической конвекции в верхней мантии с плюмом химического происхождения позволяет смоделировать образование и динамику океанических поднятий.

Эндотермический фазовый переход приводит к растеканию и дроблению нижнемантийного плюма на несколько верхнемантийных плюмов, что объясняет наблюдаемые на поверхности семейства разновозрастных океанических поднятий и базальтовых плато.

Общий вывод заключается в том, что термохимическая модель позволяет получить картину эволюции Земли, которая согласуется с геологическими, геофизическими и геохимическими данными.

В приложении 1 приведены результаты тестирования алгоритмов.

В приложении 2 показано [Котелкин, Лобковский, 2008], что овертоновый режим конвекции сохраняется при меньшем наклоне фазовой кривой, $\gamma = -1.4$ МПа/град, если увеличить вклад химических слагаемых, $C_{\text{light}} = 1.2$ и $C_{\text{esl}} = -0.44$.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих журналах, монографиях и интернет изданиях:

1. Котелкин В.Д., Лобковский Л.И. Общая теория Мясникова эволюции планет и современная термохимическая модель эволюции Земли // Физика Земли. – 2007. № 1. – С. 26-44.
2. Котелкин В.Д., Лобковский Л.И. Причины цикличности глобального геодинамического процесса // Докл. РАН. – 1999. Т. 366. № 3. – С. 369-371.
3. Котелкин В.Д., Лобковский Л.И., Вержбицкий Е.В., Кононов М.В. Геодинамическая модель образования возвышенности Шатского (Тихий океан) // Океанология. – 2004. Т. 44. № 2. – С. 278-282.
4. Лобковский Л.И., Котелкин В.Д. Двухъярусная термохимическая модель конвекции в мантии и ее геодинамические следствия (С. 29-53) / Проблемы глобальной геодинамики. Под ред. Д.В. Рундквиста. – М.: ГЕОС, 2000. – 246 с.
5. Занемонец В.Б., Котелкин В.Д., Мясников В.П. О динамике литосферных движений // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1974. № 5. – С. 43-54.

6. Lobkovsky L.I., Kotelkin V.D. Numerical analysis of geodynamic evolution of the Earth based on a thermochemical model of the mantle convection // RJES. 2004. V. 6. № 1. – P. 1-10. <http://rjes.wdcb.ru/v06/tje04144/tje04144.htm>
7. Kotelkin V.D., Lobkovsky L.I. Numerical analysis of geodynamic evolution of the Earth based on a thermochemical model of the mantle convection: 3-D model // RJES. 2004. V. 6. № 6. – P. 385-389. <http://rjes.wdcb.ru/v06/tje04165/tje04165.htm>
8. Лобковский Л.И., Котелкин В.Д. Термохимическая модель конвекции в мантии и ее геодинамические следствия (С. 432-442) / Осадочные бассейны: методика изучения, строение и эволюция. Под ред. Ю.Г. Леонова, Ю.А. Воложа. – М.: Научный мир, 2004. – 526 с.
9. Вержбицкий Е.В., Кононов М.В., Котелкин В.Д. Геотермический режим и геодинамика Северо-Восточной части Тихого океана // Океанология. – 2007. Т. 47. № 5. – С. 756-769.
10. Вержбицкий Е.В., Кононов М.В., Котелкин В.Д. Тектоника плит северной части Тихого океана // Вулканология и сейсмология. – 2007. № 6. – С. 3-18.
11. Вержбицкий Е.В., Лобковский Л.И., Кононов М.В., Котелкин В.Д. Генезис океанических возвышенностей Шатского и Хесса (Тихий океан) по геолого-геофизическим данным и результатам численного моделирования // Геотектоника. – 2006. № 3. – С. 82-93.
12. Котелкин В.Д. Процессы переноса в периодическом слое катализатора // ДАН СССР. – 1989. Т. 306. № 4. – С. 920-924.
13. Котелкин В.Д. Обратная задача аэродинамики при выборе декартовых координат в качестве зависимых переменных // МЖГ. – 1994. № 1. – С. 147-157.
14. Котелкин В.Д., Мясников В.П. Влияние деформации засыпки на течение газа в химическом реакторе с неподвижным слоем катализатора // ДАН СССР. – 1979. Т. 247. № 1. – С. 170-174.
15. Евтушенко А.И., Котелкин В.Д. Массоперенос в периодическом слое катализатора // Вестн. Моск. ун-та. Математика, механика. – 1990. № 2. – С. 98-102.
16. Есаков Ю.П., Котелкин В.Д. Гидродинамическая модель реактора с неподвижным слоем катализатора // ДАН СССР. – 1986. Т. 289. № 6. – С. 1445-1449.

17. Рубцов Н.М., Котелкин В.Д. Закономерности распространения нетеплового пламени на примере реакции термического распада треххлористого азота при низких давлениях // ТОХТ. – 2002. Т. 36. № 4. – С. 405-417.
18. Rubtsov N.M., Kotelkin V.D. On the nature of the upper limit of isothermal flame propagation in the branching-chain decomposition of nitrogen trichloride // *Mendeleev Commun.* 2001. № 2. – P. 61-64.
19. Rubtsov N.M., Kotelkin V.D. Transition from isothermal to chain-thermal flame-propagation regimes in the branching-chain decomposition of nitrogen trichloride // *Mendeleev Commun.* 2002. № 1. – P. 33-36.
20. Лобковский Л.И., Котелкин В.Д., Волож Ю.А. Двухъярусная термохимическая конвекция в мантии и ее следствия, касающиеся строения, эволюции и геодинамики Земли / *Тектоника, геодинамика и процессы магматизма и метаморфизма. М.: ГЕОС, 1999. – С. 374-377.*
21. Лобковский Л.И., Котелкин В.Д. Геодинамика мантийных плюмов, их взаимодействие с астеносферой и литосферой и поверхностное проявление в рифто- и траппообразовании / *Общие вопросы тектоники. Тектоника России. – М.: ГЕОС, 2000. – С. 304-308.*
22. Лобковский Л.И., Котелкин В.Д. Перемежающаяся термозклогитовая конвекция в мантии с учетом фазового перехода на глубине 670 км, сравнение с данными сейсмотомографии / *Тектоника неогей: общие и региональные аспекты. – М.: ГЕОС, 2001. – С. 378-381.*
23. Лобковский Л.И., Котелкин В.Д. Численное моделирование глобальной эволюции Земли на протяжении 4 млрд. лет в рамках термохимической модели мантийной конвекции / *Тектоника и геодинамика континентальной литосферы – М.: ГЕОС, 2003. – С. 352-357.*
24. Котелкин В.Д., Лобковский Л.И. Циклические закономерности эволюции Земли в рамках термохимической модели мантийной конвекции / *Общие и региональные проблемы тектоники и геодинамики – М.: ГЕОС, 2008. – С. 437-441.*

Отпечатано в отделе оперативной
печати Геологического ф-та МГУ
Тираж 100 экз. Заказ № 31

